

Movilidad respecto al Campo Eléctrico y la Frecuencia en dispositivos MESFET/HEMT

G. Rafael V.*, J. Rodríguez**, A. Tazón*, T. Fernández*, A. Mediavilla*

*Departamento de Ing. de Comunicaciones

*Universidad de Cantabria

**Etisalat College of Engineering

*e-mail: grafaelv@dicom.unican.es

**e-mail: jrodrigu@emirates.net.ae

Abstract- In a previous work [1] the observed differences between the static and dynamic V-I characteristics of MESFETs and HEMTs were attributed to electric field and frequency effects that could be accounted for via the mobility figure for the device. In this paper we continue with this work by exploring in more detail the relationship between the electric field and frequency conditions on the mobility value using a HEMT device. We believe that the original multi-bias mobility measurements described in this paper can be applied equally successfully to the MESFET device.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro del calculo de los mecanismos de transporte electrónico se tienen referencias de métodos que permiten hallar la movilidad (μ) usando sistemas físicos. Algunos de ellos están basados en el efecto Hall tales como los métodos de magnetorresistencia y magnetotransconductancia [2].

Debido a la complejidad de este sistema de medida surgieron los métodos eléctricos para el cálculo de dicho parámetro. El primero de ellos es el propuesto por [2] en el cual se utilizan aproximaciones inherentes al régimen de trabajo en bajas frecuencias y en la zona lineal. A partir de él surgieron otros métodos como los propuestos en [3-6] los cuales requieren conocer ciertos parámetros físicos adicionales como la densidad de dopado y la permitividad. Otro método es el propuesto por [7] el cual requiere conocer la longitud del canal y la frecuencia de corte. Todos estos métodos constituyen aproximaciones hechas en base a medidas Capacidad-Voltaje (CV). En el presente trabajo se plantea un nuevo método de medida que será contrastado con los tradicionales. Utilizando este método se hará un análisis de la movilidad con respecto al campo eléctrico y la frecuencia para ver su influencia en la caracterización de la corriente I_{ds} . Además se mostrarán las medidas de movilidad promedio de bajo campo en transistores de microondas utilizando el sistema Capacidad-Voltaje, para baja frecuencia, y los parámetros S, para alta frecuencia. Se ha mostrado la continuidad de los resultados extraídos por ambos métodos.

Se puede observar que las medidas hechas en puerta y en drenador generan valores similares de movilidad, demostrándose que es una propiedad intrínseca del dispositivo y se puede apreciar que la evolución la movilidad concuerda con la propuesta por otros autores. Como aporte del presente trabajo, se ha logrado describir el comportamiento de la movilidad con respecto al campo eléctrico en la zona lineal tanto en baja como en alta frecuencia. Las medidas fueron realizadas en el transistor HEMT NE3210S01.

A. ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD.

Para el análisis de movilidad en [2], se ha considerado el circuito equivalente de pequeña señal propuesto en [8] (Figura 1). Dicho método utiliza el sistema de medida Capacidad-Voltaje, el cual consiste en aplicar una señal de RF y de pequeña amplitud en la puerta utilizando la configuración propuesta en [9] de la figura 2.

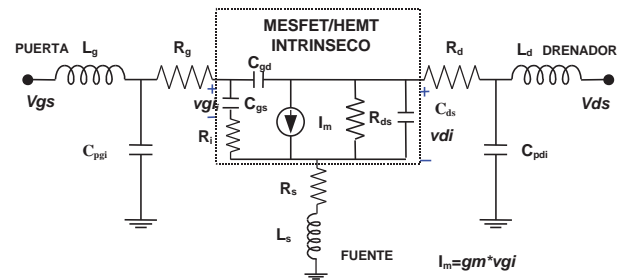


Figura 1. Circuito equivalente en pequeña señal para transistores MESFET/HEMT.

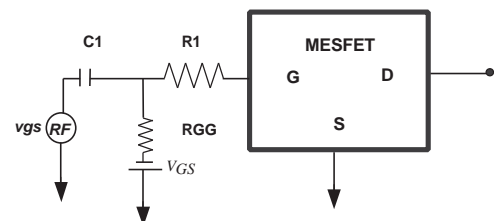


Figura 2. Sistema de Medida Capacidad-Voltaje

Utilizando este esquema y bajo aproximaciones de trabajo en zona lineal y baja frecuencia, en [2] se obtuvo la siguiente expresión para el cálculo de movilidad.

$$u = \frac{gm.L^2}{Cg.Vds.\left(\frac{Rds}{RT}\right)^2} \quad (1)$$

$$RT=Rs+Rd+Rds \quad (2)$$

Donde:

Cg : Capacidad de entrada.

gm :transconductancia

Vds :voltaje dc aplicado en la terminal del drenador.

La aproximación de la ecuación (1) supone que v_{gi} es igual a cero. En este trabajo se propone una nueva expresión que no usa esta aproximación y que considerando los efectos de v_{gi} y v_{di} muestra una mejor evolución de la movilidad sin necesidad de extraer previamente Rds .

$$u = \frac{gm.L^2}{Cg.Vds.\left(\frac{v_{di}}{v_{ds} - gm.v_{gi}.(Rd + Rs)}\right)^2} \quad (3)$$

Donde:

$$v_{di} = v_{ds} - Id.(Rd + Rs) \quad (4)$$

$$v_{gi} = v_{gs} - Id.Rs \quad (5)$$

La ventaja de este método es que nos permite hacer un barrido tanto en frecuencias bajas como en amplitudes de voltaje. En la ecuación (3) se aprecia que la movilidad es una función de los elementos intrínsecos gm y Cg y además de los elementos parásitos.

En este trabajo se ha utilizado el método CV, aunque para contrastar los resultados se ha considerado el método de la frecuencia de corte [7] el cual queda descrito por las siguientes ecuaciones:

$$f_T = \frac{gm}{2\pi.Cg} \quad (6)$$

$$v_{eff} = 2\pi.f_T.(\gamma.L)^2 \quad (7)$$

$$u_{FT} = \frac{2\pi.f_T.(\gamma.L)^2}{Vds} \quad (8)$$

B. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Dado que para el cálculo de movilidad se requiere conocer los valores de la capacidad de entrada y transconductancia; y con el fin de convertir estos valores extrínsecos generados por el método CV a sus equivalentes intrínsecos a través del de-embedding correspondiente, ha sido necesario caracterizar el transistor a efecto de hallar los valores de los elementos parásitos.

Para el caso de nuestro dispositivo dicha extracción se ha realizado a partir de los parámetros S utilizando el método propuesto en [8]. Los resultados fueron los siguientes:

Resistencias(Ω)			Inductancias(nH)			Capacidades(pF)	
HEMT NE3210S01							
Rg	Rd	Rs	Lg	Ld	Ls	Cpgi	Cpdi
3.35	2.88	0.06	0.241	0.863	0.214	0.141	0.14

Tabla 1. Extracción de elementos parásitos para el transistor HEMT NE3210S01.

A partir de estos resultados se procedió a medir la capacidad de entrada intrínseca, obteniéndose los siguientes resultados:

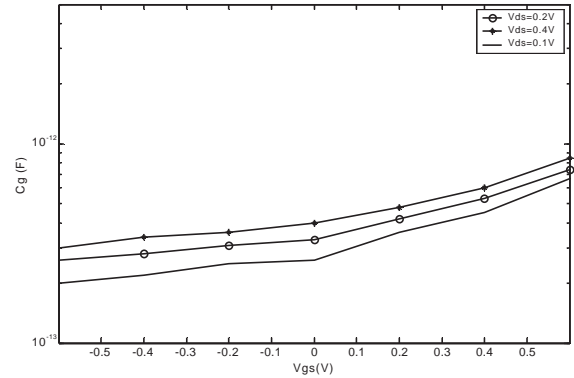


Figura 3. Valores medidos de la capacidad de entrada aplicando el método CV para el transistor HEMT NE3210S01 siendo $V_{gs}=0$, frecuencia=1MHz.

Además se utilizó el analizador de impedancias HP4194 para hacer un barrido en frecuencia con un nivel de RF de 0.1Vpp. Como resultado se observó el fenómeno de dispersión frecuencial capacitiva. Comparando las figuras 3 y 4 se aprecia que para las mismas condiciones de operación ($V_{gs}=0$ y frecuencia=1MHz), se obtienen resultados similares de capacidad. Medidas adicionales publicadas en [11] permiten comprobar dicho comportamiento.

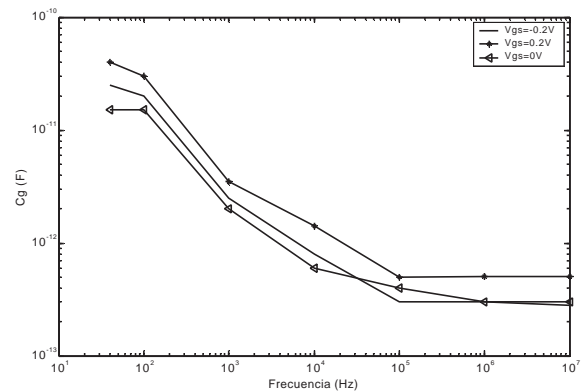


Figura 4: Medida de la Capacidad de entrada para el transistor NEC3210S01 usando el Analizador de Impedancias HP4194.

Para medir gm en baja frecuencia, se implementó el sistema de medida utilizado en [10], que es similar al sistema CV. Se observó que el valor máximo de gm se produjo en $V_{gs}=-0.2V$. Como se explicará posteriormente, este punto es importante para la caracterización de la movilidad. A partir de los valores de capacidad, y transconductancia se procedió a calcular la movilidad.

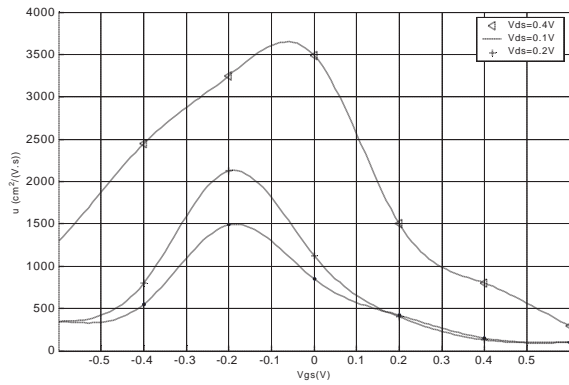


Figura 5: Medida de la movilidad utilizando el método CV a una frecuencia 1MHz para el transistor NEC3210S01

En la figura 5 se aprecia una evolución de la movilidad que concuerda con los estudios y gráficas representadas en [3]. Se aprecia que para un valor de tensión $V_{gs} = -0.2V$ y $V_{ds} = 0.2V$ la movilidad calculada es cercana a $2000 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$, la cual concuerda con los valores típicos para transistores de GaAs. Utilizando el método de la frecuencia de corte en el mismo transistor y bajo las mismas condiciones de operación se obtuvieron resultados similares. En la figura 5 se aprecia además que los portadores son más sensibles al aumento de su movilidad justamente en el punto de máxima gm. Este punto constituye el máximo local de movilidad, importante característica que ha sido analizada por Folkes [3]. Los resultados presentados hasta este momento utilizando el método CV están dados en la zona lineal, en régimen de pequeña señal y a una frecuencia de 1MHz. A continuación procederemos a hacer un barrido en frecuencia manteniendo los otros parámetros constantes utilizando el método CV de modo que se pueda analizar el comportamiento de la movilidad con respecto a un rango de frecuencias. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

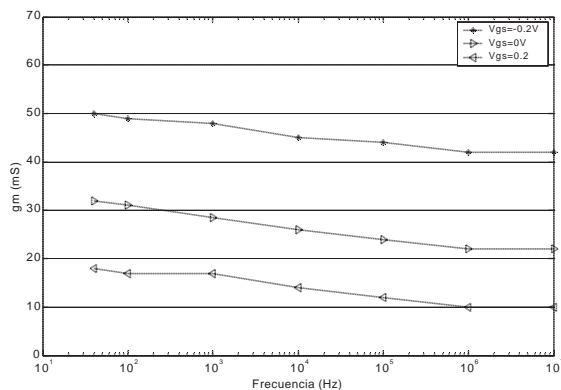


Figura 6. Medida de la dispersión de la transconductancia haciendo un barrido en frecuencia utilizando el método CV para el transistor NEC3210S01

En las figuras 4 y 6 se aprecia que las frecuencias en las que se produce la dispersión de capacidad y transconductancia son similares y están en el rango de los KHz, lo que concuerda con los estudios realizados por [11]. En base a los datos anteriores se ha calculado la movilidad la cual está representada en la siguiente figura:

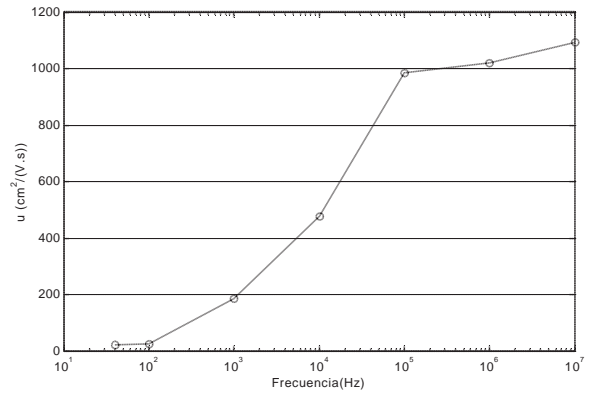


Figura 7: Medida de la movilidad haciendo un barrido en frecuencia con el método CV en el punto $V_{gs} = 0V$ y $V_{ds} = 0.2V$

En la figura 7 se aprecia que la movilidad incrementa con la frecuencia. En frecuencias más elevadas la movilidad llega a un valor cercano al de saturación, el que se puede obtener también a partir de los parámetros de Scattering como se mostrará posteriormente. Para analizar la evolución de la capacidad, transconductancia y movilidad en frecuencias más elevadas y a la vez hacer un barrido en V_{ds} es necesario medir los parámetros S.

En efecto, utilizando el método de extracción de elementos intrínsecos de Dambrine se puede representar a C_g y g_m con respecto a la frecuencia. Los resultados se muestran en la siguiente figura:

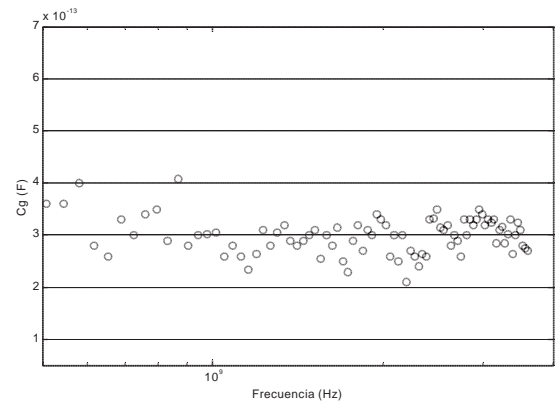


Figura 8. Medida de la capacidad C_g a partir de los parámetros S en el punto $V_{ds} = 0.2V$, $V_{gs} = 0V$

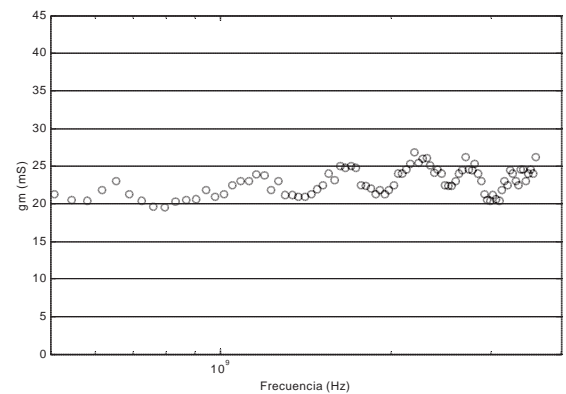


Figura 9. Medida de g_m a partir de los parámetros S en el punto $V_{ds} = 0.2V$, $V_{gs} = 0V$

Es importante resaltar que los valores finales de las figuras 4 y 6 en el punto $V_{gs}=0$, $V_{ds}=0.2V$ son similares a los representados en las figuras 8 y 9, verificándose la continuidad de los resultados obtenidos con ambos sistemas de medida. Utilizando estos datos se ha calculado la movilidad, la cual concuerda con los valores obtenidos en el rango alto de frecuencias utilizando el método CV. Para hacer un estudio en varios puntos de reposo, se ha procedido a hallar los valores de g_m y C_g para cada punto de operación, utilizando el método propuesto en [8]. De este modo se ha podido calcular la movilidad multibias. Los resultados se muestran en la figura siguiente:

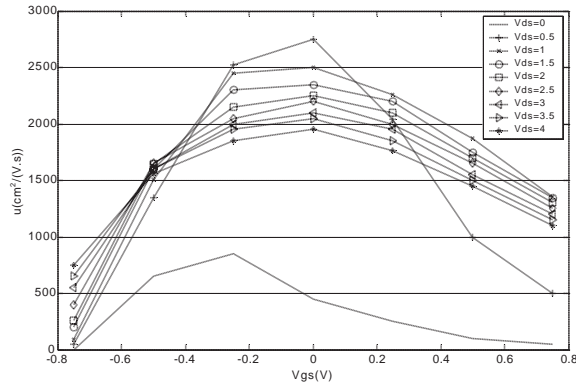


Figura 10. Movilidad multibias extraída a partir de los parámetros de Scattering.

Hasta el momento de la presente publicación no se ha encontrado una representación de la movilidad en función de V_{gs} y V_{ds} . En la figura 10 se aprecia la típica concavidad de la movilidad centrada en valores ligeramente negativos de V_{gs} . A partir de la familia de curvas se aprecia que para valores de V_{ds} pertenecientes a la zona de saturación la movilidad decrece con el campo eléctrico. En la zona lineal esta variación es inversa, lo cual a nivel físico es coherente puesto que los electrones aumentan su energía cinética debido al campo eléctrico aplicado [4]. La forma de la curva de movilidad y los valores medidos coinciden con los extraídos en [3-7]. A través de los parámetros S también se ha podido comprobar la correspondencia entre g_m y la movilidad en el sentido que sus máximos locales se producen para similares condiciones de polarización.

Como una medida adicional, se ha procedido a intercambiar las terminales del drenador por fuente utilizando el método CV en la zona lineal. En esta nueva configuración se obtuvieron los mismos valores de corriente y voltaje demostrando la simetría del transistor, por esta razón los resultados obtenidos de movilidad fueron los mismos. Esto demuestra que la movilidad es una propiedad intrínseca del semiconductor, tal como se indica en [4].

II. CONCLUSIONES

Se ha presentado un análisis de la movilidad en transistores de microondas en el régimen de pequeña señal y zonal lineal, realizando las medidas utilizando el sistema CV, el sistema del analizador de impedancias y los parámetros S . A través de estos resultados se ha analizado la dispersión frecuencial de la capacidad de entrada y de la transconductancia viendo su influencia en la extracción de la

movilidad. Ello ha permitido analizar su variación con respecto al campo eléctrico y la frecuencia. Con la nueva formulación se han obtenido resultados más exactos que con los métodos convencionales. Además se ha podido comprobar que los valores de capacidad medidos en baja frecuencia convergen en alta frecuencia hacia los valores de C_g obtenidos a partir de los parámetros S . De allí que surge la necesidad de añadir en el modelo eléctrico un elemento que considere el efecto dispersivo de esta capacidad. Dentro del área de modelado, algunos autores [9] han considerado la movilidad como una constante dentro del modelo de I_{ds} . Sin embargo, dadas las propiedades de ésta última con respecto al campo eléctrico y la frecuencia, es que se plantea utilizar una expresión analítica de movilidad para obtener un modelo más preciso de I_{ds} .

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto TIC2002-04084-C03-03 y del TIC2000-0401-P4-09. Los autores quieren agradecer el apoyo brindado por la AECl.

REFERENCIAS

- [1] J. Rodríguez-Tellez, NT Ali, T Fernandez, A. Mediavilla, A. Tazón "Electric Field Dependency of Traps in MESFET/HEMT Devices," European GAAS 2001 Conf. London Sept. 2001, pp.33-36.
- [2] R. A. Pucel, C. F. Krumm. "Simple method of measuring drift mobility profiles in thin semiconductor films," Electronics Letters. Vol.12 No 10. May 1976.
- [3] P.A. Folk. "Measurement of the low-field mobility and compensation ratio profiles in GaAs Field Effect Transistors". Appl. Phys. Lett. 48(6), February 1986.
- [4] S.M. Sze. "Physics of Semiconductor Devices". 2nd Ed. Bell Laboratories, Incorporated. Murray Hill, New Jersey. 1981
- [5] Kang Lee, Michael S. Shur, Kwyro Lee, Tho T. Vu, P.C.T. Roberts, and M. J. Helix. "Low Field Mobility in GaAs Ion Implanted FETs," IEEE. Transactions on Electron Devices. Vol. ED31. No 3. March 1984.
- [6] Byung-jong Moon, Member IEEE, Max J. Helix, Member IEEE. And Seonghearn Lee. "A New Technique to determine the average low field electron mobility in MESFET using CV measurement". IEEE. Transaction on Electron Devices. Vol. 39. No 9 September 1992
- [7] C. C. Sun, J. M. Xu, Member IEEE, A. Hagley, R. Surridge, and A. Spring Thorpe. "Electron Mobility Measurement in Short Channel FET using the Cutoff Frequency Method". IEEE Electron Device Letters. Vol.11, No 9, September 1990
- [8] José Ma. Zamanillo Sainz de la Maza. "Metodología para la Extracción Lineal y No lineal de Modelos circuitales para dispositivos MESFET y HEMT de Media/Alta Potencia". University of Cantabria. Spain. Doctoral Thesis. 1996.
- [9] J. Rodríguez-Téllez, NT Ali, T Fernandez, A Mediavilla, A Tazón, Guillermo Rafael V. "Low Frequency Mobility Effects on MESFET Device" 8th IEEE Int. Conf. on Communication Systems (ICCS 2002), Singapore, 2002
- [10] J. Rodríguez Téllez., B.P. Stothard, M.Al-Daas. "Static, pulsed and frequency-dependent current/voltage characteristics of GaAs FETs". IEE Proc. Circuits Devices Syst. Vol 143. No 3. June 1996.
- [11] M. Ozeki. K. Kodama "Surface Analysis in GaAs MESFETs by gm frequency dispersion measurement". Inst. Phys. Conf. Ser. No. 63. Chapter 7. Paper presented at Int. Symp. GaAs and Related Compounds, Japan, 1981
- [12] W. R. Curtice. "A MESFET model for use in the design of GaAs integrated circuits." IEEE. Trans. on Microwave Theory & Techniques. MTT-28 pp. 448-456, 1980.
- [13] T. Fernández, J.A. García, A. Tazón, A. Mediavilla, J.C. Pedro, and J.L. García, "Accurately Modelling the Drain to Source in Recessed Gate P-HEMT Devices", IEEE Electron Device Letters, Vol.20, No 11, November 1999, pp.557-559.